

Ригмант М. Б., Степанова Н. Н., Казанцева Н. В.  
ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

## **О СВЯЗИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ С ФАЗОВЫМ СОСТАВОМ И СТРУКТУРНЫМ СОСТОЯНИЕМ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА**

*Показано, что в изделиях из парамагнитных никелевых сплавов, упрочненных интерметаллидом  $Ni_3Al$ , при деформации и высокой температуре проявляется процесс трещинообразования в местах с аномально повышенной магнитной проницаемостью. Значение самой проницаемости, измеренное локальным методом, может служить параметром контроля качества изделий. Для кобальтовых сплавов, упрочненных интерметаллидом  $Co_3Al$ . Снижение значения намагниченности насыщения однозначно связано с появлением и ростом охрупчивающей фазы  $Co_7W_5$ . Измерение локальным методом намагниченности насыщения может быть использовано для контроля фазового состава и прочностных свойств изделий из таких сплавов.*

**Ключевые слова:** *сплавы на основе никеля и кобальта, интерметаллид, магнитная проницаемость, фазовый контроль.*

Возникновение метастабильных фазовых состояний оказывает сильное влияние на физические и механические свойства металлов и сплавов. Никелевые суперсплавы имеют широкое промышленное применение для изготовления лопаток газовых турбин, турбин ТЭЦ или турбин самолетов. Появление метастабильных фаз в никелевых суперсплавах обнаружено как при отжигах, так и после больших пластических деформаций.

$Ni_3Al$  ( $\gamma'$ -фаза) является основной упрочняющей фазой жаропрочных никелевых суперсплавов, температура Кюри которых зависит от состава легирующих элементов и может меняться от 38,9 К до 300 К. Обычно магнитные свойства никелевых суперсплавов не исследуют, поскольку рабочие температуры

этих материалов достаточно высоки (600–900 °С). Однако пластическая деформация может оказывать сильное влияние не только на прочностные, но также и на магнитные характеристики никелевых суперсплавов. В данной работе мы представляем сравнительное исследование микроструктуры, магнитной восприимчивости и фазовых превращений в различных никелевых суперсплавах после больших пластических деформаций.

### **Материал и методика эксперимента**

Исследования проводили на монокристаллах никелевых суперсплавов типа ВКНА-4У (90 %  $\gamma'$ -фазы) и ЭИ-437-Б (9 %  $\gamma'$ -фазы) с ориентацией [001], выращенных из расплава по методу Бриджмена, и поликристаллических образцах сплава ЭП-800 (40 %  $\gamma'$ -фазы), вырезанных из лопатки турбины после аварии. Образцы суперсплава ЭИ-437-Б деформировали прокаткой при комнатной температуре. Для деформации образцов суперсплава ВКНА-4У применяли метод ударно-волнового нагружения. Опыты по ударно-волновому нагружению были выполнены в РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск. Нагружение проводилось ударом стальной пластиной (максимальное давление на поверхности образцов 100 ГПа, длительность импульса 1 мкс). Рентгеноструктурный анализ (РСА) был выполнен с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3 (излучение  $\text{Cu K}_\alpha$  и  $\text{Co K}_\alpha$ ). Магнитные исследования были выполнены при комнатной температуре с помощью измерителя магнитной проницаемости маломagnetных сплавов и аустенитных сталей ИМПАС-1, численный расчет был выполнен с использованием эталонных образцов с известной магнитной восприимчивостью. Исследования микроструктуры проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-200СХ в Центре электронной микроскопии УрО РАН.

### **Результаты эксперимента и обсуждение**

#### **Магнитные свойства**

Магнитные исследования, в частности измерения магнитной восприимчивости, позволяют обнаружить присутствие очень малых

структурных фазовых изменений в сплаве (менее 1 %), происходящих в объеме материала. Глубина проникновения для прибора (локального измерителя магнитной проницаемости), использованного для измерения магнитной восприимчивости в данной работе, составляет 5–7 мм.

При выполнении рентгеноструктурных исследований измерения производят практически с поверхности материала, при этом изменения в кристаллической структуре сплава, которые могут быть обнаружены методами РСА, должны составлять порядка 3–4 % (для нейтронографии, поскольку в этом случае глубина проникновения нейтронов выше, чем рентгеновских лучей) и не менее 5 % – для РСА. С этой точки зрения использование неразрушающих магнитных методов при небольшом количестве новой фазы в материале может оказаться достаточно полезным для ее обнаружения.

Исследования изменения магнитной восприимчивости в зависимости от степени деформации были выполнены для трех никелевых суперсплавов, включая интерметаллидный сплав  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Cr})$ , а также для монокристаллов никелевого суперсплава ЭИ-497-Б (направление прокатки вдоль направления  $[110]$  кристаллической решетки  $\gamma'$ ).

На рис. 1 приведены данные зависимости магнитной восприимчивости никелевых суперсплавов ЭИ-437-Б и ВКНА-4У от степени деформации. В отличие от монокристалла  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Cr})$  магнитная восприимчивость суперсплавов после деформации увеличивается, в суперсплаве ЭИ-437-Б данный эффект растет по мере увеличения степени деформации. Такое же изменение наблюдается и в сплаве ВКНА-4У (90 %  $\gamma'$ ) после 20 ГПа. Более ярко изменение магнитной восприимчивости с деформацией проявляется в сплаве ВКНА-4У после 100 ГПа: по сравнению с исходным состоянием величина магнитной восприимчивости после деформации меняется почти на два порядка. Кроме того, также можно отметить явно выраженную анизотропию величины магнитной восприимчивости по отношению к ориентации монокристалла суперсплава ВКНА-4У, которая отсутствовала в исходном образце и появилась после

деформации (при ударно-волновом нагружении образец устанавливался так, что направление [001] в кристаллической решетке  $\gamma'$ -фазы было параллельно оси деформации).

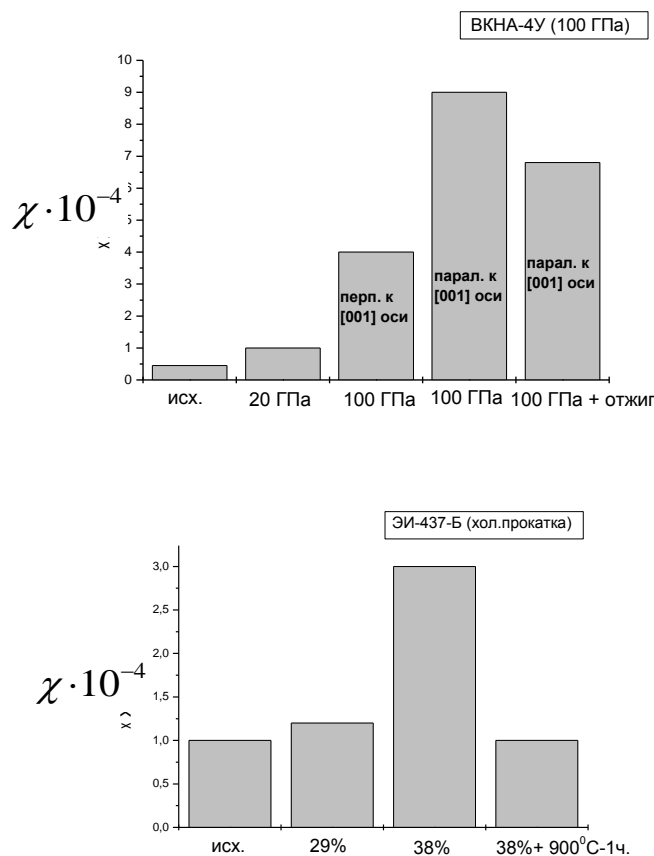


Рис. 1. Изменение магнитной восприимчивости суперсплавов в зависимости от степени деформации и отжига

Таким образом, сопоставляя данные магнитных исследований, РСА и нейтронографии для сплавов с различным содержанием  $\gamma'$ : Ni<sub>3</sub>Al (100 %), ВКНА-4У (90 %), ЭИ-437-Б (9 %) и ЭП-800 (40 %) можно предположить, что изменение величины магнитной восприимчивости связано с перестройками ближайшего окружения атомов никеля в кристаллической структуре  $\gamma'$ -фазы, которые удастся обнаружить по данным РСА и нейтронографии, как только количество новой фазы становится достаточным для чувствительности приборов, используемых в этих методах. При этом, как можно видеть из приведенных рисунков, режимы

отжига сплавов с высоким содержанием интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы, использованные в данной работе, не приводят к полному восстановлению исходного магнитного состояния, а значит, и структурного состояния, что никак не удастся отследить, используя данные просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

**Сплавы на основе кобальта** имеют кубовидную структуру, схожую со структурой никелевых сплавов, в которых упрочнение происходит за счет выделения интерметаллидной фазы (в данном случае  $\text{Co}_3\text{Al}$  вместо  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ). Кобальтовые сплавы обладают ферромагнитными свойствами и сохраняют их при нагреве до высоких температур, что позволяет использовать их как высокопрочный и жаропрочный материал, например, для современных магнитопроводов с повышенными прочностными свойствами. Одной из проблем получения таких материалов является неоднородное распределение вольфрама в сплаве в литом состоянии. Для повышения однородности сплава и улучшения эксплуатационных механических свойств литых сплавов были проведены операцииковки и термообработки ( $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 5 ч). Из рис. 2 видно, что послековки и термообработки материал сплава остается в ферромагнитном состоянии с относительной потерей не более 25 % от величины намагниченности насыщения литого сплава. Он не теряет своих эксплуатационных свойств в качестве высокопрочного материала для магнитопроводов при существенном улучшении упругопластических свойств и повышении стабильности структуры и фазового состава по отношению к высокой температуре. Результаты работы наглядно показывают, что применение неразрушающих магнитных методов можно успешно использовать для контроля фазовых превращений и структурного состояния исследованных сплавов.

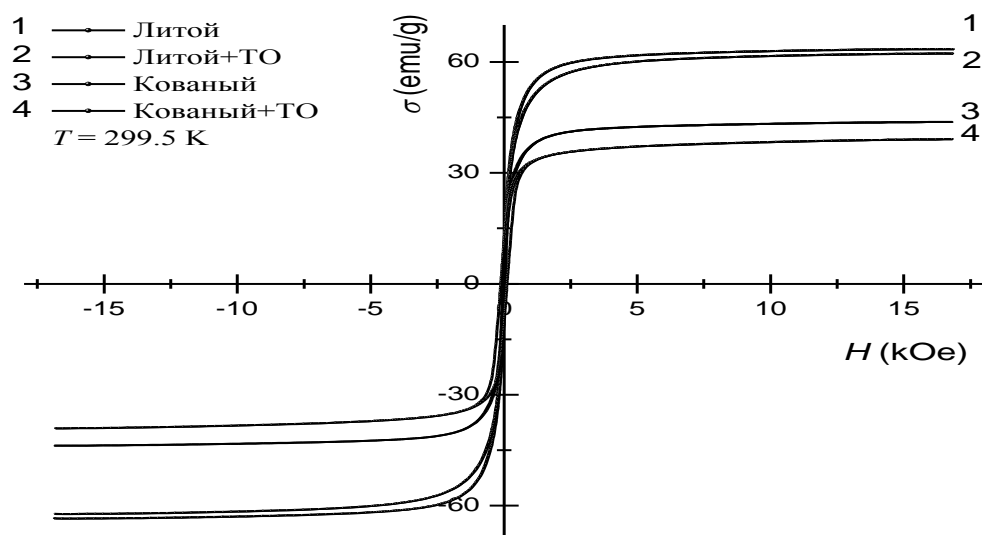


Рис. 2. Петли гистерезиса для сплавов кобальта системы Co-Al-W

Работа выполнена по бюджетной теме ИФМ УрО РАН «Структура» с частичной поддержкой гранта РФФИ № 14-08-00108.